



بررسی اثر غلظت محلول مواد مغذی بر نرخ مه سازی فراصوتی جهت به کارگیری در سامانه‌های هواکشت

امیرحسین میرزابه^۱، علی حاجی احمد^{۲*}، علی فدوی^۳، شاهین رفیعی^۴، سید محمدحسین افتخاری^۵

۱. دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران (a_h_mirzabe@ut.ac.ir)
۲. استادیار گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران (hajiahmad@ut.ac.ir)
۳. دانشیار گروه مهندسی فناوری صنایع غذایی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران (afadavi@ut.ac.ir)
۴. استاد گروه مهندسی مکانیک ماشین‌های کشاورزی و مکانیزاسیون، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران (shahinrafiee@ut.ac.ir)
۵. دانشجوی کارشناسی مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران (smh.eftekhari@ut.ac.ir)

چکیده

سیستم هواکشت یکی از روش‌های کشت بدون خاک در محیط‌های رشد کنترل شده است. پژوهش‌های انجام شده در زمینه تولید گیاهان زینتی، زراعی، باغی و دارویی با استفاده از سیستم هواکشت حاکی از موفقیت آمیز بودن این روش است. یکی از جنبه‌های بهینه‌سازی و افزایش عملکرد تولید گیاهان در سامانه‌های هواکشت به کارگیری تجهیزات و فناوری مناسب است. از قسمت‌های اصلی در سامانه‌های هواکشت، سامانه تولید و انتقال مه به ریشه گیاه است. در پژوهش پیش رو، با توجه به معایب و محدودیت‌های روش‌های مرسوم تولید مه در سامانه‌های هواکشت، امکان‌سنجی اولیه در راستای به کارگیری فناوری تولید مه به روش امواج فراصوت انجام گرفت. در این راستا محلول‌هایی با غلظت‌های متفاوت از ترکیب آب مقطر و کود شیمیایی NPK آماده‌سازی و در یک محفظه آب‌بند مجهز به سامانه تولید امواج فراصوت و سامانه حمل ذرات مه به محیط خارج ریخته شدند. هر یک از محلول‌ها به مدت ۷۰ دقیقه تحت اثر امواج فراصوتی قرار گرفته و تأثیر امواج بر نرخ تولید مه و تغییرات سختی و شوری محلول‌ها مورد بررسی قرار گرفت. مقادیر نرخ کاهش جرم برای غلظت‌های ۰، ۳، ۶ و ۹ گرم بر لیتر به ترتیب برابر با ۲/۷۶۴، ۲/۸۴۰، ۱/۲۹۰ و ۲/۰۸۰ گرم بر دقیقه بود. همچنین مقدار عددی افزایش سختی و شوری به ترتیب برابر با ۲۲، ۳۶۰، ۵۴۰ و ۶۴۰ PPM و ۳۸۰، ۶۸۰، ۹۰۰ و ۱۲۲۰ میکروموس بر سانتیمتر به دست آمد.

کلمات کلیدی: موج فراصوتی، محرک پیزوالکتریک، مه پاش، کود شیمیایی، سختی، شوری

*نویسنده مسئول: hajiahmad@ut.ac.ir



بررسی اثر غلظت محلول مواد مغذی بر نرخ مه سازی فراصوتی جهت به کارگیری در سامانه‌های هواکشت

مقدمه

کشت هیدروپونیک با قابلیت کیفیت و کمیت بالای تولید محصول، یکی از روش‌های کشت است که از سال‌ها قبل دانشمندان به اهمیت آن پی برده‌اند. در این تکنیک آب و مواد غذایی به میزان موردنیاز در اختیار گیاه قرار گرفته و از هدرروی، آلودگی و مسمومیت آب جلوگیری شده و در نهایت با صرف هزینه‌های کمتر تولید، بازدهی بیشتر اقتصادی حاصل می‌شود [۱]. کشت هیدروپونیک دارای ۶ روش کلی شامل روش نوار غذایی یا NFT، شناوری، موبینگی، قطره‌ای، غوطه‌وری یا DWC و هواکشت است. یکی از روش‌های جدید هیدروپونیک سیستم هواکشت است که در نوع خود مدرن‌ترین روش کشت محسوب می‌شود [۲۲].

سیستم هواکشت، یکی از روش‌های کشت بدون خاک در محیط‌های رشد کنترل شده است. در این روش قسمت‌های زیرزمینی گیاه در داخل یک محفظه تاریک قرار داشته و توزیع آب و مواد غذایی به ریشه گیاه توسط یک مه پاش انجام می‌گیرد [۴]. از مزایای سیستم هواکشت می‌توان به بهبود هوادهی اطراف ریشه‌ها در مقایسه با روش آب کشت [۳۰]، افزایش محصول ناشی از رشد ریشه در هوا و بدون فشار مکانیکی [۱۳] محدود شدن آب مورد استفاده، بازیافت و استفاده مجدد از محلول غذایی و کنترل خوب ترکیب محلول غذایی و pH [۳] نام برد. علاوه بر این، جلوگیری از بیماری‌های خاک‌زری [۱۹] مناسب برای تولید عاری از ویروس بعضی از محصولات [۱۸]، افزایش سرعت رشد و روشی سریع برای تولید بذر سالم [۲۱]، برداشت راحت‌تر و تمیزتر بعضی از محصولات و امکان‌پذیری مدیریت اندازه محصول در برداشت‌های متوالی [۲۵] از دیگر مزایای روش هواکشت هستند.

امروزه، از سیستم هواکشت در تولید گیاهان زینتی، باغی و زراعی مختلف استفاده شده است [۷ و ۱۷]. این روش کاشت با موفقیت برای تولید گونه‌هایی مثل کاهو [۱۳]، گوجه‌فرنگی [۷]، خیار [۲۳]، گل داوودی [۲۰]، گیاه فریون مکزیکی [۲۷] سیب‌زمینی [۱۱] مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین پژوهش‌های زیادی جهت استفاده از سامانه‌های کشت مبتنی بر افزایش عملکرد نسبت به کشت خاکی انجام شده است. نتایج اغلب این پژوهش‌ها رضایت‌بخش بوده و نشان‌دهنده برتری روش هواکشت نسبت به روش‌های مرسوم است. مینی تیوبرهای تولیدی در سیستم کشت هیدروپونیک و هواکشت سیب‌زمینی مورد بررسی قرار گرفته و مشخص شد که عملکرد غده تولیدی در بوته در سیستم هواکشت ۷۰ درصد و تعداد غده بیش از ۲/۵ برابر بود [۲۵]. تأثیر روش کشت بر روی تعداد مینی تیوبر بررسی و افزایش تعداد مینی تیوبر سیب‌زمینی در مترمربع در سیستم هواکشت نسبت به روش معمولی را ۴۹۳ عدد گزارش شد [۱۴].

علاوه بر گیاهان زراعی و باغی، استفاده از سیستم هواکشت در تولید گیاهان دارویی موفقیت‌آمیز بوده است. تولید گیاهان دارویی مختلف نظیر زنجبیل، بابا آدم، گزنه و ریحان فندقی به روش هواکشت سبب افزایش عملکرد آن‌ها نسبت به کشت خاکی گردید [۱۵]. مقدار کلروجنیک گیاه خار بابا آدم تولید شده در شرایط هواکشت در مدت ۶ ماه برابر مقدار کلروجنیک گیاهان دوساله در شرایط نرمال بود [۱۶]. در حالی که گیاه شیرین بیان در شرایط عادی از سال سوم و چهارم تولید ماده مؤثره را دارد، کشت گیاهان شیرین بیان در سیستم هواکشت DFT سبب تولید ماده مؤثره در ۶ ماه اول رشد گردید [۵].

با توجه به مزایای بیان شده برای سیستم هواکشت، در شرایط کمبود و بحران آب، این فناوری کشور را قادر می‌سازد تا بذور و محصولات موردنیاز خود را سریعاً، در مقادیر زیاد، قیمت مناسب و سلامت بالا تولید نماید. لذا این فناوری می‌تواند برای تأمین پایدار محصولات کشاورزی موردنیاز به‌طور سالانه به لحاظ اقتصادی و تأمین امنیت غذایی کشور نقش به‌سزایی ایفا نماید [۲]. علاوه بر این، با توجه به نیاز مستمر کشور به تولید بعضی از محصولات سازگار با سیستم هواکشت از قبیل سیب‌زمینی و زعفران که امکان‌پذیر کردن صادرات آن به کشورهای خارجی، ضرورت دارد که نسبت به بهینه‌سازی و افزایش عملکرد سامانه‌های هواکشت اقدام نمود [۳].

بهینه‌سازی و افزایش عملکرد تولید گیاهان در سامانه‌های هواکشت از دو جنبه قابل بررسی است. یک جنبه دست یافتن به شرایط مناسب برای رشد گیاهان متفاوت و تنظیم پروتکل‌های مربوطه و جنبه دیگر به کارگیری تجهیزات و فناوری بهینه برای کنترل و فراهم کردن شرایط رشد مناسب است. از قسمت‌های اصلی در سامانه‌های هواکشت، سامانه تولید و انتقال مه به ریشه گیاه است. جهت تولید مه می‌توان از سامانه‌های گریز از مرکز (معمولاً دیسک چرخان)، نازل مه پاش، یا امواج فراصوت استفاده کرد [۱۰ و ۳۱]. از یک سو، روش متمایز کردن مایع مغذی تأثیر قابل توجهی در اندازه‌ی ذرات تولیدشده دارد و از سوی دیگر، اندازه‌ی نسبی قطرات تولیدشده تأثیر بسزایی در درصد جذب مواد غذایی توسط نمونه‌ها دارد. اندازه‌ی نسبی ذرات مه تولیدی توسط مکانیسم فراصوت در مقایسه با مکانیسم‌های دیگر کوچک‌تر و دارای توزیع اندازه یکنواخت‌تری است که جذب آن‌ها توسط بافت گیاهی آسان‌تر است.

به امواج صوتی که دارای بسامدی بیشتر از بازه‌ی بسامدی شنوایی انسان (محدوده‌ی ۲۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز) هستند، امواج فراصوت گفته می‌شود. کشف امواج فراصوت به سال ۱۸۷۶ برمی‌گردد. از آن زمان به بعد این امواج کاربردهای فراوانی در زمینه‌ی پزشکی، صنایع غذایی، صنعت و کشاورزی پیدا کرده‌اند. برای تولید امواج فراصوت به صورت مصنوعی روش‌های بسیاری وجود دارند. در تولید امواج مکانیکی با استفاده از الکتریسیته معمولاً از دو روش مغناطیسی (با استفاده از سیم پیچ) یا خاصیت پیزو الکتریسیته استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر، این فناوری کاربردهای زیادی در زمینه‌ی صنایع غذایی و کشاورزی پیدا کرده است [۱۲]. یکی از کاربردهای فناوری فراصوت، که در سال‌های اخیر در حوزه‌ی بیوتکنولوژی نیز مورد توجه قرار گرفته است، تولید مه یا بخار سیالات مایع است. در سال‌های اخیر، در طراحی‌های جدید بیورآکتورهای مه پاش سامانه‌های تولید مه مواد غذایی مجهز به مکانیسم مه سازی امواج فراصوت مورد توجه مهندسين طراح قرار گرفته است.

با توجه به نیاز کشور به توسعه سامانه‌های هواکشت و نیز برخی از معایب روش‌های متداول تولید مه در سامانه‌های هواکشت از قبیل ایجاد تنش برشی بر روی ریشه گیاه در اثر دمش هوا درون سیستم، مسدود شدن نازل‌های مه پاش در اثر تماس مداوم با نمک‌های محلول در مواد غذایی و نیاز به استفاده از تجهیزات اضافی به منظور بازیافت مه پس از میعان بر روی ریشه گیاه، امکان به کارگیری سامانه فراصوتی جهت تولید مه کودهای شیمیایی در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تولید موج فراصوتی از یک محرک پیزو الکترونیک استفاده شد. تیمارهای مختلف محلول آب مقطر و کود NPK آماده‌سازی و نرخ تولید مه و تغییرات شوری و سختی محلول‌ها اندازه‌گیری شد.

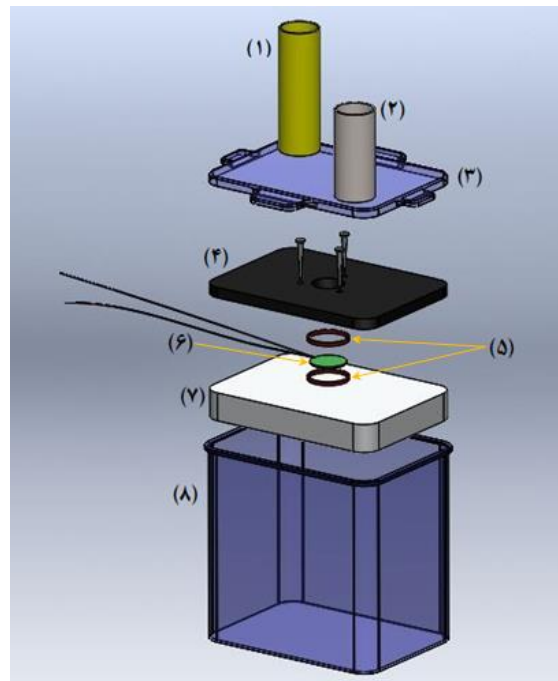
مواد و روش‌ها

آماده‌سازی سامانه تولید مه

اعمال فشار به برخی از کریستال‌ها مانند کوارتز، که مرکز تقارن ندارند، باعث تولید الکتریسیته می‌شود. این فرآیند در اثر جابجا شدن دوقطبی‌های ایجادشده در کریستال و پدید آمدن میدان الکتریکی رخ می‌دهد. عکس این فرآیند نیز در مواد پیزو الکترونیک رخ می‌دهد؛ یعنی با اعمال جریان الکتریسیته به این گونه مواد، می‌توان باعث ایجاد تنش و فشار و در نتیجه ایجاد ارتعاش و نوسان در آن‌ها شد. نوسان با دامنه بسیار کم و بسامد بسیار زیاد می‌تواند اثرات موضعی شدیدی ایجاد کند که از این اثرات ایجادشده می‌توان برای کاربردهای مختلف استفاده کرد. در آزمایش‌های انجام‌شده از یک عدد سرامیک پیزو الکترونیک با قطر ۲۰ و ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شد. برای راه‌اندازی محرک پیزو الکترونیک مدار الکتریکی با خروجی فرکانس ۱/۱۲ مگاهرتز و ولتاژ ۳۰ ولت طراحی و ساخته شد.

پیزو الکترونیک در کف مخزنی که طول و عرض و ارتفاع آن به ترتیب برابر با ۱۱۰، ۸۰ و ۱۰۰ میلی‌متر بود قرار داده شد. برای نصب پیزو الکترونیک در کف مخزن از ورق آکرلیک (پلی متیل متاکریلات) به ضخامت ۶ میلی‌متر در قسمت فوقانی و ورق PVC به ضخامت ۱۶ میلی‌متر در قسمت تحتانی پیزو الکترونیک استفاده شد. به منظور قرارگیری مطلوب و جلوگیری از لقی احتمالی، ورق آکرلیک و PVC

با دستگاه برش لیزر و متناسب با ابعاد مقطع مخزن بریده شدند. همچنین بر روی ورق آکرلیک سوراخی با قطر ۱۸ میلی متر توسط برش لیزر ایجاد شد تا پیزو الکتریک از طریق این سوراخ با مایع (محللول آب مقطر و کود شیمیایی با غلظت‌های متفاوت) در تماس قرار گیرد. استفاده از ورق آکرلیک و PVC در نصب پیزو الکتریک با هدف ثابت کردن پیزو الکتریک در جای خود و حذف درجات آزادی آن انجام گرفت. در قسمت بالایی و پایینی پیزو الکتریک برای جلوگیری از آسیب مکانیکی به آن و شکستگی احتمالی و همچنین آب‌بندی کردن قسمت زیرین پیزو الکتریک از واشر سیلیکونی استفاده گردید. بنابراین پیزو الکتریک بین دو واشر در بالا و پایین خود و واشرها به نوبه خود بین ورق آکرلیک و PVC قرار گرفتند. با استفاده از سه عدد پیچ، دو ورق آکرلیک و PVC به یکدیگر محکم شده و در کف مخزن قرار داده شدند. همچنین دو رشته سیم خروجی از پیزو الکتریک از بین دو ورق عبور داده شده و با ایجاد سوراخ ریزی در قسمت فوقانی مخزن به مدار الکتریکی متصل گردیدند. نمای انفجاری مخزن تولید مه در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- نمای انفجاری سامانه تولید مه فراصوتی، (۱) لوله خروج مه (۲) لوله ورود هوا (۳) در آب‌بند مخزن (۴) صفحه آکرلیک (۵) واشر سیلیکونی (۶) پیزو الکتریک (۷) صفحه PVC (۸) مخزن

آماده‌سازی سامانه انتقال مه تولیدشده

برای ایجاد قابلیت اندازه‌گیری نرخ مه تولیدشده لازم بود که مه تولیدشده از درون مخزن به محیط خارج انتقال داده شود؛ لذا از یک الکتروفن با قابلیت تنظیم دور موتور استفاده شد. بر روی کناره‌های در مخزن، دو سوراخ با قطر ۲۵ میلی متر ایجاد و دو لوله یک اینچی به ارتفاع‌های ۷۰ و ۱۲۰ میلی متر قرار داده شد. ابتدا لوله‌ها به مخزن چسبانده شده سپس جهت جلوگیری از نشت هوا، محل‌های اتصال لوله‌ها و در مخزن توسط چسب سیلیکون آب‌بندی شدند. لوله کوچک‌تر (ارتفاع ۷۰ میلی متر) در امتداد لوله خروجی الکتروفن و با فاصله ۲ میلی متر از آن قرار گرفت. علت در نظر گرفتن فاصله ۲ میلی متری بین لوله ورودی مخزن و خروجی فن، جلوگیری از وارد شدن وزن ناشی از فن به مخزن و به تبع آن به سیستم اندازه‌گیری جرم (ترازو) بود.

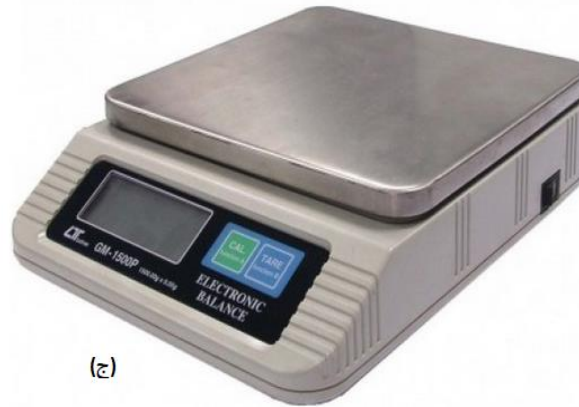
پیزو الکتریک در هنگام کار، موج مکانیکی با فرکانس بالا را وارد مایع می‌کند که منجر به پاشش مایع به بالا و ایجاد تلاطم در مایع می‌شود. این پاشش و تلاطم باعث شکل‌گیری ذرات کوچک با قطر در محدوده ۰/۰۱ تا ۱۰ میکرون می‌شود [۳۳]. اما درعین حال قطرات



(الف)



(ب)

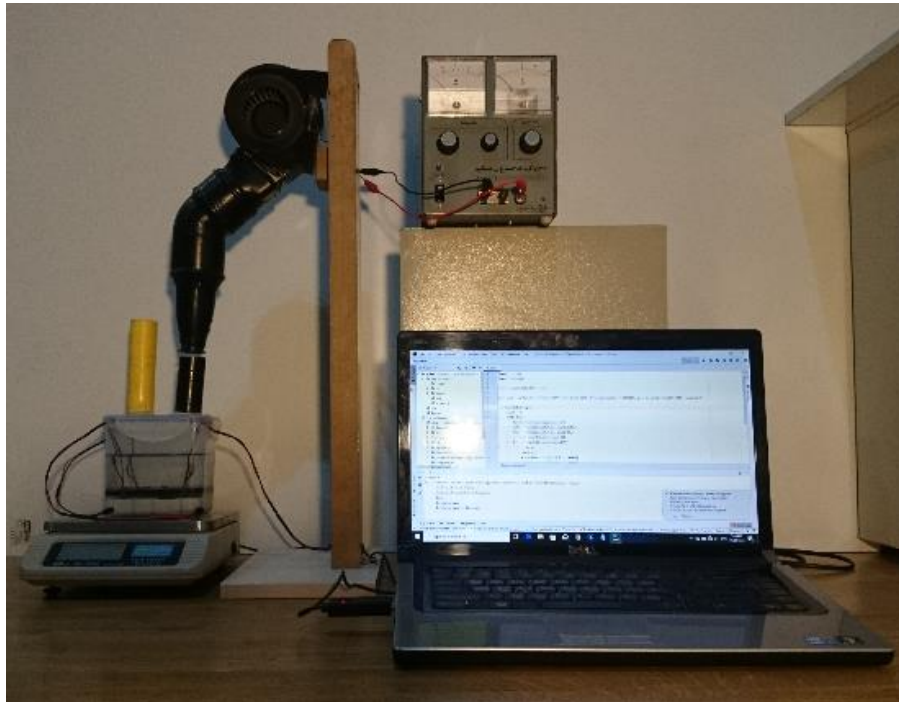


(ج)

شکل ۲- ابزار اندازه‌گیری استفاده شده جهت فراهم کردن شرایط ایدئال و داده‌برداری، (الف) سختی و شوری سنج دیجیتال، (ب) سرعت سنج دیجیتال و (ج) ترازوی دیجیتال

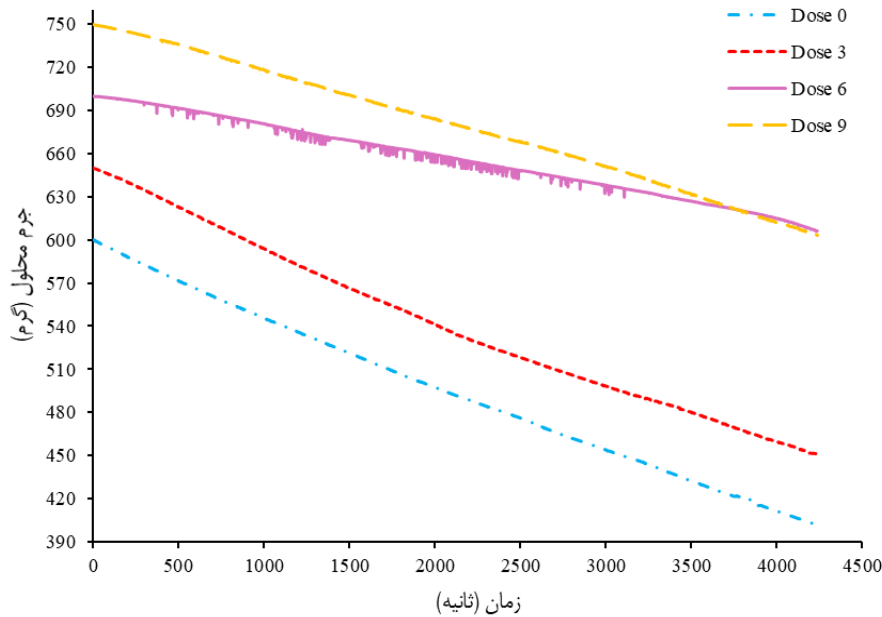
تحلیل نتایج

سامانه آماده شده برای بررسی اثر غلظت کود شیمیایی بر نرخ تبخیر در اثر موج فراصوت در شکل ۳ نشان داده شده است. همان گونه که قبلاً اشاره شد، دور فن طوری تنظیم شد که سرعت هوای ورودی به مخزن تولید مه برابر با ۵ متر بر ثانیه باشد. این سرعت ورودی به مخزن باعث می‌شد که سرعت هوا در خروجی مخزن هنگام کارکرد پیستون در محدوده ۳ تا ۴ متر بر ثانیه تغییر کرده و هیچ گونه خروج قطرات درشت از مخزن وجود نداشته باشد. افت سرعت در خروجی مخزن نسبت به ورودی آن به علت ناشی از تغییر ماهیت مکانیکی سیال ورودی و خروجی است. در قسمت ورودی سیال (هوا) دارای رطوبتی برابر با رطوبت محیط (در طول مدت زمان آزمایش کمتر از ۴۰ درصد اندازه‌گیری شد) و اما در قسمت خروجی سیال (مخلوط بخار آب و هوا) دارای رطوبت نسبی نزدیک ۱۰۰٪ بود. لذا با توجه به اینکه چگالی آب بسیار بیشتر از هواست، افت قابل توجه سرعت در خروجی مخزن قابل توجیه است.



شکل ۳- سامانه آماده‌شده برای اندازه‌گیری نرخ کاهش جرم مایع در اثر کارکرد پیزو الکتریک

پس از انجام کلیه آزمایش‌ها داده‌های ذخیره‌شده توسط نرم‌افزار پایتون که در قالب فایل متنی بودند توسط نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۳ فراخوانی شده و در نرم‌افزار اکسل عملیات آماری بر روی آن‌ها انجام شد. نتایج به‌دست آمده در شکل ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که جرم اولیه هر چهار غلظت تولیدشده برابر با 2 ± 60.0 گرم بود اما برای نمایش محسوس نتایج، با توجه به آنکه پیش‌بینی می‌شد که نمودارها بر هم منطبق شده و تشخیص آن‌ها از یکدیگر دشوار گردد، در کلیه آزمایش‌ها برای غلظت‌های ۳، ۶ و ۹ علاوه بر مخزن و ضمایم آن، به ترتیب وزنه‌های ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ گرم بر روی ترازو قرار داده شدند. با توجه به شکل برای آب مقطر بدون اضافه کردن کود مقدار کاهش جرم در از ابتدا تا انتهای آزمون برابر با $198/20$ گرم بود؛ مقادیر کاهش جرم برای غلظت‌های ۳، ۶ و ۹ گرم در لیتر به ترتیب برابر با $199/05$ ، $93/75$ و $147/10$ گرم بود. بنابراین با توجه به نتایج مذکور می‌توان نتیجه گرفت که افزودن کود شیمیایی به آب مقطر می‌تواند فرایند مه‌سازی فراصوتی آب را تحت تأثیر قرار دهد. برای غلظت ۳ گرم در لیتر افزایش جزئی در مقدار کاهش جرم مشاهده شد اما برای دو غلظت ۶ و ۹ گرم در لیتر کاهش قابل توجه در مقدار کاهش جرم نسبت به آب مقطر مشاهده شد.



شکل ۴- تغییرات جرم محلول با غلظت‌های متفاوت نسبت به زمان

همچنین با توجه به شکل شیب نمودارها در مقاطع زمانی متفاوت یکسان نیست. به منظور بررسی دقیق‌تر نرخ مه تولیدی برای هر آزمایش، کل بازه زمانی داده‌برداری که برابر با ۷۰ دقیقه بود به ۷ بازه ۱۰ دقیقه‌ای تقسیم شد. شیب نمودارها برای هر بازه ۱۰ دقیقه‌ای محاسبه شد. همچنین مقادیر ضریب تبیین برای هر یک از بازه‌های ۱۰ دقیقه‌ای محاسبه شد که مقادیر به دست آمده برای شیب و ضریب تبیین در جدول ۲ نشان داده شده است.

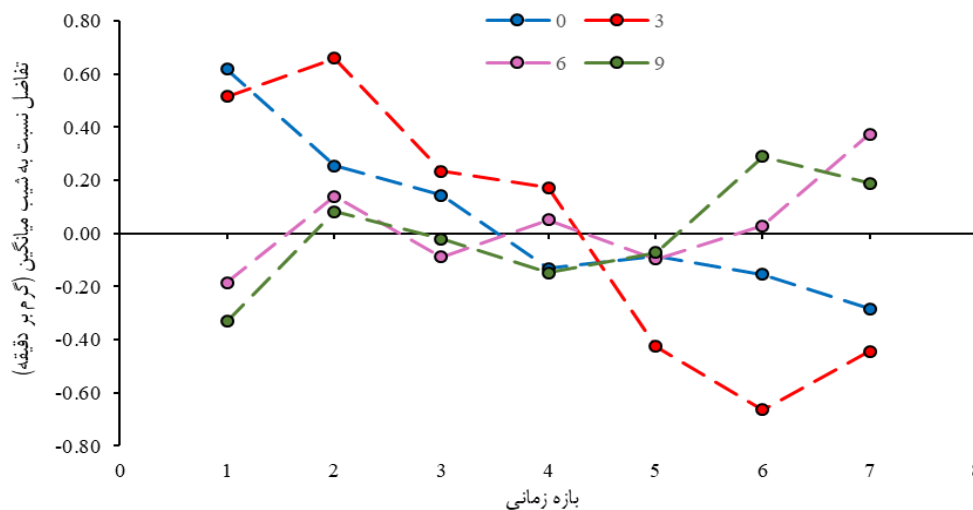
جدول ۲- نرخ کاهش جرم و ضرایب تبیین به دست آمده در بازه‌های زمانی متفاوت در فرایند مه سازی محلول آب مقطر و کود شیمیایی با غلظت‌های متفاوت توسط امواج فراصوتی با بسامد ۱/۱۲ مگاهرتز

پارامتر	غلظت (گرم بر لیتر)	بازه زمانی (دقیقه)							
		۱۰-۰	۲۰-۱۰	۳۰-۲۰	۴۰-۳۰	۵۰-۴۰	۶۰-۵۰	۷۰-۶۰	۷۰-۰
نرخ کاهش جرم (g/min)	۰	۳/۳۸۳	۳/۰۱۹	۲/۹۰۹	۲/۶۳۴	۲/۶۸۱	۲/۶۱۱	۲/۴۸۱	۲/۷۶۴
	۳	۳/۳۶۵	۳/۴۹۹	۳/۰۷۵	۳/۰۱۲	۲/۴۱۶	۲/۱۷۶	۲/۳۹۶	۲/۸۴۰
	۶	۱/۱۰۶	۱/۴۳۰	۱/۲۰۲	۱/۳۴۱	۱/۱۹۳	۱/۳۱۹	۱/۶۶۳	۱/۲۹۰
	۹	۱/۷۴۹	۲/۱۶۳	۲/۰۶۰	۱/۹۳۲	۲/۰۰۹	۲/۳۷۰	۲/۲۶۹	۲/۰۸۰
ضریب تبیین	۰	۰/۹۹۹	۱/۰۰۰	۱/۰۰۰	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۵	۰/۹۹۸
	۳	۰/۹۹۸	۱/۰۰۰	۰/۹۹۹	۰/۹۹۷	۱/۰۰۰	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۳
	۶	۰/۹۴۹	۰/۹۴۲	۰/۸۵۰	۰/۸۴۰	۰/۹۱۳	۰/۹۷۷	۰/۹۸۹	۰/۹۹۸
	۹	۰/۹۹۷	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹	۰/۹۹۹

با توجه به نتایج مندرج در جدول ۲، در تمامی شرایط مقدار کاهش جرم بین ۱/۱ تا ۳/۷ گرم بر دقیقه تغییر کرد. بیشترین مقدار کاهش جرم مربوط به غلظت ۳ گرم در لیتر و بازه زمانی ۱۰-۰ دقیقه و کمترین مقدار مربوط به غلظت ۶ گرم در لیتر و در همان بازه زمانی بود.

همچنین در تمامی موارد مقدار ضریب تبیین بین ۰/۸۴ تا ۱ تغییر کرد که کمترین مقادیر ضریب تبیین مربوط به تیمار غلظت ۶ گرم در لیتر بودند. لازم به ذکر است، با توجه به اینکه در هر بازه زمانی ۱۰ دقیقه‌ای، رگرسیون گیری بین ۳۵۳ جفت داده انجام شده است، کلیه ضرایب تبیین به دست آمده در سطح احتمال ۱٪ معنی دار هستند. برای یک مدل رگرسیونی خطی در صورتی که درجه آزادی برابر با ۳۰۰ باشد و مقدار ضریب تبیین برابر با ۰/۱۴۸ باشد آنگاه مدل در سطح احتمال ۱٪ معنی دار است [۲۹]. حال آنکه درجه آزادی کلیه مدل‌ها در ۷ بازه ۱۰ دقیقه‌ای برابر با ۳۵۱ و کلیه ضرایب تبیین بالاتر از ۰/۸۴۰ بودند.

با توجه به نتایج به دست آمده در بعضی از بازه‌های زمانی مقدار نرخ مه سازی نسبت به نرخ میانگین بیشتر و در بعضی از این بازه‌ها نرخ مه سازی کمتر از میانگین بود. تفاضل شیب نسبت به شیب میانگین برای هر یک از بازه‌های زمانی در شکل ۵ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵، دو تیمار غلظت ۰ و ۳ گرم در لیتر در ۳۰ دقیقه ابتدایی فرایند مه سازی رفتار مشابه داشته و هر دو در این بازه نرخ تولید مه بیشتری نسبت به میانگین از خود نشان می‌دهند. همچنین هر دو تیمار ۰ و ۳ گرم در لیتر در ۳۰ دقیقه پایانی فرایند نرخ تولید مه کمتری نسبت به میانگین از خود نشان می‌دهند. علاوه بر این، دو تیمار ۶ و ۹ گرم در لیتر در ۶ بازه از مجموع ۷ بازه رفتار مشابهی در تولید مه نسبت به میانگین داشتند.



شکل ۵- تفاضل شیب در هر بازه زمانی ۱۰ دقیقه‌ای نسبت به شیب میانگین

در آزمایش‌های انجام شده مقادیر اولیه و ثانویه شوری و سختی برای هر تیمار غلظت اندازه‌گیری شد که نتایج حاصل از آن در جدول ۳ نشان داده شده است. بنا بر نتایج به دست آمده، زمانی که مایع برای مدت زمان قابل توجه تحت اثر امواج فراصوت قرار می‌گیرد، مقادیر شوری و سختی آن تحت تأثیر قرار گرفته و دستخوش تغییر می‌شود. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش غلظت کود در محلول، همان‌گونه که انتظار می‌رود شوری و سختی اولیه محلول افزایش پیدا می‌کند. علاوه بر این، در تمامی تیمارها، قرارگیری تحت اثر امواج فراصوتی می‌تواند باعث افزایش سختی و شوری سیال گردد. هرچند با افزایش مقدار غلظت کود در محلول مقدار عددی افزایش سختی و شوری ناشی از قرارگیری تحت امواج فراصوت بیشتر می‌شود اما درصد تغییرات نسبت به مقدار اولیه روند کاهشی دارد.

جدول ۳- تغییرات شوری و سختی مایع در فرایند مه سازی محلول آب مقطر و کود شیمیایی با غلظت‌های متفاوت توسط امواج فراصوتی با بسامد ۱/۱۲ مگاهرتز

غلظت (گرم در لیتر)	TDS یا سختی (PPM)				EC یا شوری (میکرو موس بر سانتیمتر)			
	اولیه	نهایی	اختلاف	درصد افزایش	اولیه	نهایی	اختلاف	درصد افزایش
۰	۴۲	۶۶	۲۲	۵۲/۳	۶۴	۱۰۲	۳۸	۵۹/۴
۳	۱۷۰۰	۲۰۶۰	۳۶۰	۲۱/۲	۳۶۵۰	۴۳۳۰	۶۸۰	۱۸/۶
۶	۲۷۲۰	۳۲۶۰	۵۴۰	۱۹/۸	۵۵۵۰	۶۴۵۰	۹۰۰	۱۶/۲
۹	۳۳۹۰	۴۰۳۰	۶۴۰	۱۸/۸۸	۷۵۶۰	۸۷۸۰	۱۲۲۰	۱۳/۹

بنا بر منابع موجود، دو ایده‌ی کلی در مورد مکانیسم تولید مه توسط امواج فراصوت وجود دارد. در ابتدا پژوهشگران عقیده داشتند، امواج پراکنده شده توسط مبدل فراصوت باعث وقوع پدیده کاویتاسیون، مستقیماً در زیر سطح مایع گردیده و ترکیدن حباب‌ها، مومنتوم قطرات مایع را به حدی بالا برده که با غلبه بر نیروی کشش سطحی و گرانش از سطح مایع جدا شده و منجر به تشکیل مه می‌گردند [۲۸]. هرچند نتایج برخی از پژوهش‌های انجام شده نشان داده است که ناپایداری‌های موجود در امواج سطحی عامل ایجاد امواج کاپیلاری در سطح مایعات شده که فرآیند مه سازی را انجام می‌دهند [۲۶]. تئوری امواج کاپیلاری بر اساس جریان تیلور بنانه‌شده است و بیانگر ناپایداری برهم کنش گاز و مایع در اثر نیروی عمودی وارد شده به آن می‌باشد [۲۴]. در ادامه، نتایج تحقیقات انجام شده نشان داده‌اند که فرآیند مه سازی مایعات توسط امواج فراصوت، ترکیبی از هر دو تئوری مطرح شده می‌باشد و برهم کنش امواج کاپیلاری و تنش اعمالی از طرف کاویتاسیون مایع، منجر به تشکیل ذرات مه می‌گردند [۳۲، ۹، ۸ و ۶]. نتایج به دست آمده در این تحقیق نشان می‌دهد که قرارگیری مایعات تحت اثر امواج فراصوتی نه تنها تحت عنوان کاویتاسیون و امواج کاپیلاری باعث تغییر حالت فیزیکی مایعات می‌گردد، بلکه می‌تواند ترکیب شیمیایی مایعات را هم دچار تغییر کند.

نتیجه گیری

با توجه به نیاز کشور به توسعه سامانه‌های هواکشت و نیز برخی از معایب روش‌های متداول تولید مه در سامانه‌های هوا کشت امکان به کارگیری سامانه فراصوتی جهت تولید مه کودهای شیمیایی در پژوهش حاضر مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تولید موج فراصوتی از یک محرک پیزو الکتریک جهت تولید تیمارهای مختلف محلول آب مقطر و کود NPK استفاده شد. چهار تیمار غلظت ۰، ۳، ۶ و ۹ گرم در لیتر آماده و هر کدام به مدت ۷۰ دقیقه تحت تأثیر امواج فراصوتی تولید شده توسط پیزو الکتریک قرار داده شدند. همچنین به علت مشاهده تغییرات نرخ کاهش جرم در طول ۷۰ دقیقه، کل بازه انجام آزمایش به ۷ زیر بازه ۱۰ دقیقه‌ای تقسیم شد. همچنین شوری و سختی اولیه و ثانویه هر یک از تیمارها اندازه گیری شد.

نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش غلظت کود از صفر به ۳ گرم در لیتر باعث افزایش جزئی در نرخ تولید مه می‌شود؛ اما در ادامه و با افزایش غلظت نرخ تولید مه کاهش یافت. علاوه بر این در طول آزمایش، برای هر یک از تیمارهای غلظت، نرخ تولید مه دچار تغییر می‌شد که می‌توان علت آن را با تغییر ارتفاع سیال در بالای پیزو الکتریک توجیه کرد. با توجه به اینکه پدیده مه سازی توسط امواج فراصوت در اثر برآیند دو عمل کاویتاسیون و امواج کاپیلاری اتفاق می‌افتد بنابراین برای هر سیال مقادیر پارامترهای کشش سطحی، ویسکوزیته، دما و ارتفاع سیال می‌تواند نرخ تولید مه را تحت تأثیر قرار دهد.

نتایج حاصل از اندازه‌گیری سختی و شوری محلول‌ها قبل و بعد از انجام آزمایش نشان داد که قرارگیری تحت اثر امواج فراصوتی می‌تواند باعث افزایش مقادیر شوری و سختی سیال شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که قرارگیری در معرض امواج فراصوتی نه تنها

می‌تواند حالت فیزیکی سیال را تغییر دهد بلکه تغییرات شیمیایی هم در ترکیب سیال ایجاد می‌کند. با وجود اینکه هر دو مقدار شوری و سختی ثانویه نسبت به مقادیر اولیه‌شان افزایش داشتند اما با افزایش غلظت کود، درصد افزایش شوری و سختی کاهش داشت. به علاوه برای سه تیمار حاوی کود شیمیایی درصد افزایش شوری و سختی کمتر از ۲۲٪ بود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در حین فرایند مه سازی، مواد شیمیایی نیز همراه با آب تبدیل به مه شده و انتقال داده شده‌اند.

با توجه به اینکه روش امواج فراصوتی قابلیت انتقال مواد شیمیایی محلول در آب را دارد، استفاده از روش مه سازی فراصوتی در سامانه‌های هوا کشت می‌تواند به عنوان یک روش جایگزین برای روش‌های مه سازی متداول مطرح شود. علی‌رغم اینکه مقادیر نرخ تولید مه در کلیه شرایط کمتر از ۲۰۰ میلی‌لیتر در ساعت به دست آمد، بهینه‌سازی‌هایی از قبیل افزایش ولتاژ ورودی به محرک پیزو الکتریک، افزایش بسامد تحریک پیزو الکتریک، تعیین ارتفاع بهینه سیال در بالای محرک پیزو الکتریک، به کارگیری هم‌زمان تعداد زیادی پیزو الکتریک و ... می‌تواند نرخ تولید مه را تا چند لیتر در ساعت افزایش دهد. بنابراین جهت تعیین مزایا، معایب، محدودیت‌ها، حدود بهینه و امکان‌سنجی کاربرد این روش در سامانه‌های هواکشت مطالعه و پژوهش بیشتری نیاز است.

منابع

۱. استاجی، ا. و روستا، ح.ر. ۱۳۹۴. اثر تغذیه کودهای مختلف نیتروژن بر پارامترهای فتوسنتزی گیاه دارویی شیرین بیان (*Glycyrrhiza glabra*) در سیستم هواکشت. نهمین کنگره علوم باغبانی، اهواز، دانشگاه شهید چمران اهواز.
۲. حسن پناه، د. ۱۳۹۳. ارزیابی پتانسیل تولید مینی تیوبر ارقام و کلون‌های امیدبخش نیمه‌دیررس سیب‌زمینی در سیستم هواکشت. نشریه علمی پژوهشی اکوفیزیولوژی گیاهان زراعی. جلد هشتم ۳(۳۱): ۳۴۶-۳۳۱.
۳. رضایی، م.، معینی، الف.، دهقانی، ح.، موحدی، ز. ۱۳۹۴. بررسی اثر پاکوبوترازول در تولید ریزغده و خصوصیات رویشی سیب زمینی (*Solanum tuberosum* L.) در سیستم هواکشت. تولیدات گیاهی (مجله علمی کشاورزی). ۱(۳۸): ۶۲-۵۳.
۴. روستا، ح.ر.، رشیدی، م.، کریمی، ح.ر.، علایی، ح.، تدین‌نژاد، م. ۱۳۹۱. مقایسه رشد رویشی و عملکرد ریزغده در سه رقم سیب‌زمینی در سیستم‌های هواکشت و هیدروپونیک کلاسیک (بستر) و سه محلول غذایی مختلف. مجله علوم و فنون کشت های گلخانه ای. ۴(۱۴): ۷۹-۷۳.

5. Afreen, F., Zobayed, S. M. A., & Kozai, T. (2005). Spectral quality and UV-B stress stimulate glycyrrhizin concentration of *Glycyrrhiza uralensis* in hydroponic and pot system. *Plant Physiology and Biochemistry*, 43(12), 1074-1081.
6. Bassett, J.D. and Bright, A.W., 1976. Observations concerning the mechanism of atomisation in an ultrasonic fountain. *Journal of Aerosol Science*, 7(1), pp.47-51.
7. Biddinger, E.J., C.M. Liu, R.J. Joly, and K.G. Raghothama. 1998. Physiological and molecular responses of aeroponically grown tomato plants to phosphorus deficiency. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 123: 330-333.
8. Boguslavski, Y.Y., 1969. Physical mechanism of the acoustic atomization of a liquid. *Sov. Phys. Acoust.*, 15, pp.14-21.
9. CHIBA, C., 1975. Atomization of Liquid by Immersed and Convergent Ultrasonic Vibrators: Case of Distilled Water. *Bulletin of JSME*, 18(118), pp.376-382.
10. Eknadiosyants, O.K., 1970. Poluchenie aerolei. *Fizicheskie osnovy ul'trazvukovoi tekhnologii* (Production of Aerosols. Physical Principles of Ultrasonic Technology), Rozenberg, LD, Ed.
11. Farran, I., and A.M. Mingo-Castel. 2006. Potato mini-tuber production using aeroponics. Effect of plant density and harvesting intervals. *American Journal of Potato Research*. 83(1): 47-53.

12. Firouz, M.S., Farahmandi, A. and Hosseinpour, S., 2019. Recent advances in ultrasound application as a novel technique in analysis, processing and quality control of fruits, juices and dairy products industries: A review. *Ultrasonics sonochemistry*.
13. Gysi, C., and F.V. Allmen. 1997. Balance of water and nutrients in tomatoes grown on soilless systems. *Agrarforschung*. 4: 1.
14. Hassanpanah, D. 2011. Evaluation of the possibility of mini-tuber production in Aeroponic system and comparison with conventional system. *Modern Science of Sustainable Agriculture Journal*. 7(2): 1-10. (In Persian).
15. Hayden, A.L. 2006. Aeroponic and Hydroponic Systems for Medicinal Herb, Rhizome, and Root Crops. *Hortscience*. 41(3). 16-18.
16. Hayden, A.L., G.A. Giacomelli, T. Yokelson, and J.J. Hoffmann. 2004. Aeroponics: An alternative production system for high-value root crops. *Acta Hort* 629:207-213.
17. He, J., and Lee, S.K. 1998. Growth and photosynthetic responses of three aeroponically grown lettuce cultivar (*Lactuca sativa* L.) to different rootzone temperatures and growth irradiances under tropical aerial conditions. *Journal of Horticultural Science*, 73: 173-180.
18. Kang, B.K., and S.H. Han. 2005. Production of seed potato (*Solanum tuberosum* L.) under the recycling capillary culture system using controlled release fertilizers. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science*. 74(4): 295-299.
19. Lugt, C., K.B.A. Bodlaender, and G. Goodijk. 1964. Observation on the induction of second growth in potato tubers. *European Potato Journal*. 4: 219- 227.
20. Molitor, H. and Fischer, M., 1997, May. Effect of several parameters on the growth of chrysanthemum stock plants in aeroponics. In *International Symposium on Growing Media and Hydroponics* 481 (pp. 179-186).
21. Nichols, M., B. Christie, A. Jegathees and J. Gibson. 2004. Rapid high health seed potato production using aeroponics. At Massey University. <http://www.maximumyield.com/viewart.php?article=182>.
22. Nugaliyadde, M.M., H.D.M. De Silva, R. Perera, D. Ariyaratna, and U.R. Sangakkara. 2005. An aeroponic system for the production of pre-basic seeds of potato. *Annals of Sri Lanka Department of Agriculture*. 7: 199-208.
23. Park, H.S., M.H. Chiang, and H.S. Park. 1997. Effects of form and concentration of nitrogen in aeroponic solution on growth, chlorophyll, nitrogen contents and enzyme activities in *Cucumis sativum* L. plant. *Korean Society for Horticultural Science*. 38: 642-646.
24. Peskin, R.L. and Raco, R.J., 1963. Ultrasonic atomization of liquids. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 35(9), pp.1378-1381.
25. Ritter, E., B. Angulo, P. Riga, C. Herran, J. Relloso, and M. Sanjose. 2001. Comparison of hydroponic and aeroponic cultivation systems for the production of potato mini-tubers. *Potato Research*. 44: 127-135.
26. Rooney, J.A., 1981. 6. Nonlinear Phenomena. In *Methods in Experimental Physics* (Vol. 19, pp. 299-353). Academic Press.
27. Scoggins, H.L., and H.A. Mills. 1998. Poinsettia growth, tissue nutrient concentration, and nutrient uptake as influenced by nitrogen form and stage of growth. *Journal of Plant Nutrition*. 21: 191-198.
28. Simon, J.C., Sapozhnikov, O.A., Khokhlova, V.A., Crum, L.A. and Bailey, M.R., 2015. Ultrasonic atomization of liquids in drop-chain acoustic fountains. *Journal of fluid mechanics*, 766, pp.129-146.
29. Snedecor, G.W.C. and William, G., 1989. *STATISTICAL METHODS/GEORGE W. SNEDECOR AND WILLIAM G. COCHRAN* (No. QA276. 12. S6313 1989.).



30. Soffer, H., and D.W. Burger. 1988. Effects of dissolved oxygen concentration in aeroponics on the formation and growth of adventitious roots. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 3: 218-221.
31. Topp, M.N. and Eisenklam, P., 1972. Industrial and medical uses of ultrasonic atomizers. *Ultrasonics*, 10(3), pp.127-133.
32. Topp, M.N., 1973. Ultrasonic atomization-a photographic study of the mechanism of disintegration. *Journal of Aerosol Science*, 4(1), pp.17-25.
33. Weathers, P., Liu, C., Towler, M. and Wyslouzil, B., 2008. Mist reactors: principles, comparison of various systems, and case studies. *Electronic Journal of Integrative Biosciences*, 3(1), pp.29-37.

Investigation of effect of nutrient solution concentration on ultrasonic misting rate to apply in aeroponic systems

Amir Hossein Mirzabe¹, Ali hajiahmad^{2*}, Ali Fadavi³, Shahin Rafiee⁴ and Mohammad Hossein Eftekhri⁵

1. Department of Biosystems Engineering, University of Tehran
2. Department of Biosystems Engineering, University of Tehran
3. Department of Food Technology Engineering, University of Tehran
4. Department of Biosystems Engineering, University of Tehran
5. Department of Biosystems Engineering, University of Tehran

Abstract

Aeroponic system is one of the methods of soilless cultivation in controlled growing environments. Researches on the production of ornamental, crop, horticultural, and medicinal plants using Aeroponic system have shown that this method is successful. One of the aspects of optimizing and enhancing crop production performance in aeroponic systems is using of appropriate equipment and technology. One of the main parts in aeroponic systems is the production and transfer system of mist to the plant roots. In the present study, due to the disadvantages and limitations of conventional methods of misting in aeroponic systems, the initial feasibility study was carried out in line with the application of ultrasonic misting technology. In this regard, solutions with different concentrations of distilled water and NPK fertilizer were prepared and dumped into a sealed chamber equipped with ultrasonic mister and particle transporter systems. The solutions were affected by ultrasonic for 70 minutes and the effect of the waves on the mist production rate and the hardness and salinity changes of the solutions were investigated. The mass reduction rate values for concentrations of 0, 3, 6 and 9 were 2.764, 2.840, 1.290 and 2.2080 g / min, respectively. Also for the concentrations of 0, 3, 6 and 9 the numerical values of hardness and salinity increase were 22, 360, 540 and 640 PPM and 380, 680, 900 and 1220 $\mu\text{m} / \text{cm}$, respectively.

Key words: Ultrasonic wave, piezoelectric actuator, mister, chemical fertilizer, total dissolved solids, electrical conductivity

*Corresponding author: Ali Hajiahmad

E-mail: hajiahmad@ut.ac.ir